

连云港洪门古沙堤沉积特征及其意义

徐 军^{1,2}, 殷 勇¹, 朱大奎¹, 朱小兵¹

(1 南京大学 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210093; 2 河海大学 水资源环境学院, 南京 210098)

摘要:通过钻孔、年代地层、沉积物粒度和有孔虫组合综合分析,并配合探地雷达,对洪门古沙堤的成因类型以及古海岸环境进行了探讨。洪门古沙堤沉积物和海州湾现代沙滩、苏北平原贝壳堤相比较,颗粒集中在粗砂—极粗砂范围,分选性偏差,极有可能形成于靠近河口或受河口影响的环境。探地雷达揭示洪门古沙堤曾有过向海方向的进积和生长,指示当时沙源丰富。洪门古沙堤的浅钻地层反映了洪门地区在 6 400 aBP 左右为滨海沼泽环境,此时期与青莲岗文化期的年代相吻合;潮沼沉积结束后,洪门地区迎来了中全新世的最大海侵,受周围地形的制约,洪门地区可能形成了河口浅海湾环境,普遍沉积了 2 m 左右的青灰色淤泥沉积,有孔虫组合反映当时的环境并非完全开敞,而是受到一定程度限制的近岸浅水环境,反映了洪门地区为浅海湾环境;6 000 aBP 左右,随着砂质沉积物供应的丰富以及相对海平面下降,洪门古沙堤开始发育,直到 5 000 aBP 苏北和连云港地区普遍发生海退,古沙堤发育结束。

关键词:古沙堤;粒度;探地雷达;古海岸环境;连云港洪门

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2007)01-0023-13

古沙堤是海岸平原上重要的地貌标志,对于恢复古海岸环境(波浪、潮流和沿岸泥沙供应)、确定岸线进退和恢复海平面变化历史,进而研究海陆相互作用具有重要的意义。目前国际、国内对于古沙堤的研究,从方法上有了很大的提高,除了传统的沉积学和地貌学研究方法外,引进了 3S 方法(remote sensing、GPS、GIS)和探地雷达(ground-penetrating radar)方法。新方法特别是探地雷达的引进使我们能够大量而快速地获得古沙堤的地层信息,特别是传统地层学、地貌学方法无法获得的高分辨率信息^[1-4]。

晚更新世以来随着海平面的升降和进退,在苏北平原留下了多条与海岸平行的古沙堤。关于苏北平原和海州湾西部古沙堤,已有相当丰富的研究成果^[5-8]。这些成果归纳起来,主要包括 3 个方面的研究内容。一是从沉积学特征(粒度、矿物组成和古生物)和地貌学特征探讨古沙堤的成因,例如古沙堤发育和海平面变化的关系,河流物质供应、海滩坡度变化对古沙堤发育的影响等^[5];二是对古沙堤进行年代学研究^[9];三是将古沙堤作为古海岸线的一个重要标志,结合古沙堤的发育年代恢复古海岸线的位置^[7,10]。

有关海州湾古沙堤和古贝壳堤,南京大学海洋地貌和沉积研究室完成的江苏海岸考察研究报告^①以及江苏省海岸带和海涂资源综合调查^[10]是 20 世纪 80 年代这方面的标志性成果,报告比较全面地总结了海州湾古沙堤的成因以及和海平面变化的关系。王富葆通过¹⁴C 年代学研究,发现海州湾从西向东存在 4 组由老到新的埋藏贝壳堤和出露地表的古沙堤,其年代从大于 4 万年到 900 年^[11]。这些由老到新的古沙堤为海岸线演变以及海岸环境变化提供了直接的证据。张传藻利用大量的钻孔地层、考古数据对古沙堤进行了研究,认为一共存在 8 条埋藏贝壳堤和出露地表的古沙堤^[12],但由于引用的测年资料相互矛盾或缺乏关键的测年数据,降低了资料的引用价值。

由于海滩沙可以作为建筑材料,许多古沙堤被挖走,目前连云港保存完好的古沙堤已经非常少见。由于洪门此地一直是个果园,所以古沙堤才得以完好保存。关于洪门古沙堤目前为止未见任何的研究报道,我们认为洪门古沙堤和苏北平原古沙堤相比具有自己的特点,对于其沉积特征和成因的研究将有助于更深入地了解连云港地区海岸线的变迁历史以及古海岸环境的演变,同时,我们也借此机会试验一下探地雷达方法对于古沙堤内部结构探测的效果。

基金项目:国家自然科学基金项目(40271004);江苏省自然科学基金项目(BK2002089)

作者简介:徐 军(1967—),女,副教授,南京大学在读博士,专业为海岸带资源与环境。

收稿日期:2006-08-02; **改回日期:**2006-12-10。 张光威编辑

^① 南京大学海洋地貌与沉积研究室. 江苏海岸考察研究报告(内部资料). 1984.

1 自然地理背景

研究区内沿岸陆地地貌包括云台山(由锦屏山、前云台山、中云台山和后云台山组成)变质岩山地,一般高 300~600 m,主要由前震旦纪混合花岗岩和片麻岩组成。云台山周围发育山前堆积台地,高程 4~40 m。外围发育海积平原,高程 2.5~4 m,主要为淤泥、黏土夹砂和贝壳沉积^[10]。

连云港海岸地貌类型主要包括海州湾北部的砂质海岸、中部的基岩岸和南部的粉砂淤泥质岸。自岚山头到柘汪为堆积岸段,柘汪以南到兴庄河口岸线平直,走向南北,分布有海岸沙坝、浅滩和岸外沙坝,该段海岸受侵蚀并逐步后退。临洪河口附近,岸线长 3 km,为稳定型粉砂淤泥质海岸,沿岸河流流经黄土区,带来丰富的细粒物质。连云港的西墅至大跳板岸线长 40 km,属于基岩海岸,基岩海岸的港湾有砂质堆积,如海头湾海滨浴场和墟沟大海湾等。兴庄河口—西墅以及烧香河口至灌河口,为侵蚀性的粉砂淤泥质海岸,泥沙来源主要是历史时期的黄河夺淮,黄河的输沙作用是导致本区海岸发育的主导因素^[10]。

连云港海州湾沿岸分布有 4 条与海岸线平行的

古贝壳堤和古沙堤,自西向东为:(1)徐朱孟贝壳沙堤。距海堤 8 km, ^{14}C 年代大于 4 万年,推测该贝壳沙堤为玉冰期中期间冰期段高海面的产物。(2)郑园桥东—四新桥之间的贝壳沙堤。距海堤 6 km,蛤的 ^{14}C 年代为 $(7\,682\pm 250)\text{ a}$ 。(3)头陀贝壳沙堤。距海堤 4 km, ^{14}C 年代为 $(2\,532\pm 76)\text{ a}$ 。(4)黄沙村贝壳沙堤。距海堤 3 km, ^{14}C 年代为 $(809\pm 94)\text{ a}$,出露于地表,顶面高程 2.5~3 m^[11]。

洪门位于连云港市西部的第四纪海积和冲积平原,陇海铁路在其北面通过,新沐河及蔷薇河在此交汇后流入临洪河入海。洪门目前是一块果园用地,由于是古沙堤因而比周围海积平原地势高,并且在地势最高处形成一个居民居住区。过蔷薇河向东南方向为古海州城所在地,地势较高,海州城东南方向为锦屏山风景名胜区。洪门古沙堤呈 NWW—SEE 方向延伸,其东西方向长约 1 500 m,南北方向宽约 500 m,面积约为 75 hm^2 。洪门果园被南北方向的小路分割成 3 小块,我们的研究区域主要集中在西面(图 1)。洪门果园的地势南高北低,砂层厚度南部要比北部厚。从洪门果园向北和向南,砂层厚度迅速尖灭并过渡为泥质沉积。目前洪门果园除表层有人工扰动以外,地层结构基本保存完好,十分有利于进行古沙堤的研究。

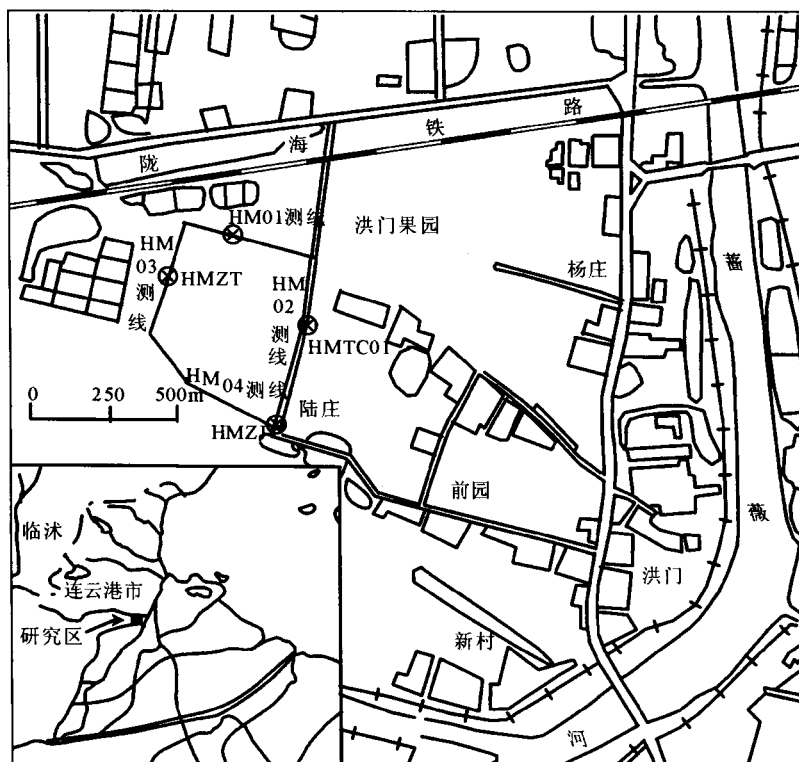


图 1 研究区域位置以及探地雷达测线和钻孔分布

Fig. 1 Distribution of study area and ground penetrating radar route and bores

2 研究方法

采用沉积学、地貌学和地球物理方法三位一体相互配合获得古沙堤的浅地层信息,古沙堤的内部结构通过探地雷达图像获得。探地雷达是利用电磁波穿透地下介质,获得反射信号的地球物理方法^[1,13]。只要地下介质存在介电性质上的差异,比如说砂和泥的接触界面,就可以在雷达图像上产生反射界面,从而获得地下地质体的内部结构。

探地雷达图像需要通过钻孔或者露头加以验证,我们在每条测线的关键部位都布置了相应的钻孔。钻孔使用的是加拿大生产的手摇钻以及当地打井队使用的简易钻探工具,由于钻探使用的是非机动工具,钻孔深度受到限制,最大深度不超过5 m,由于3 m以下多是淤泥层,所以基本能满足探地雷达的解译要求。钻孔中,凡有岩性发生变化的层位都进行了采样。现场对沉积物的颜色、粒度、沉积序列、所含生物进行了描述。

对取得的所有粒度样做了粒度分析,样品中有颗粒大于1 mm的用筛选法测粒度。筛分间距为 $1/4 \Phi$ 。其余在南京海岸与海岛开发教育部重点实验室用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪测试粒度。该仪器粒径测试范围为 $0.02 \sim 2\,000 \mu\text{m}$,粒径间距为 0.25Φ ,粒级分辨率为 0.1Φ 。部分样品做了有孔虫分析,南京大学海岸与海岛教育部重点实验室徐军进行有孔虫样品的采集与处理,鉴定由加拿大微体古生物专家 Jean Pierre Guilbault 教授完成。采用传统的 ^{14}C 测年方法对泥炭层以及贝壳进行了年代测量。

3 结果

3.1 沉积物特征

为了配合雷达剖面的解译,选取了若干关键点进行钻孔取样,在洪门果园共布置了4个钻孔。分别为 HMZT 孔、HMZJ 孔、HMTC01 孔和 HMTC02 孔,其岩性特征描述如下(图2):

HMZJ 孔:

- (1) 0~0.3 m 棕红色粗砂质人工填土
- (2) 0.3~1.3 m 深棕色含细砾中—粗砂,粒度比较均一。含少量黏土
- (3) 1.3~2.2 m 土黄色细砾质中—粗砂,颗粒呈次棱角状

(4) 2.2~2.7 m 黑色极粗砂—粗砂质细砾,砾石次圆—次棱角状,含少量黏土

(5) 2.7~3.3 m 粗砂—极粗砂质细砾,砾石次圆—次棱角状

(6) 3.3~3.6 m 粗砂质细砾,含贝壳碎片,砂砾次圆—次棱角状

(7) 3.6~4.8 m 灰黑色淤泥,未见底。

HMZT 孔:

(1) 0~0.2 m 棕黑色砂质耕作土

(2) 0.2~1.5 m 黄色含细砾—细砾质中—粗砂,含大量重矿物

(3) 1.5~1.7 m 黄白色含泥、极粗砂质细砾

(4) 1.7~1.9 m 含黏土极粗砂质细砾,松散,下部出现少量贝壳碎片

(5) 1.9~2.35 m 含贝壳极粗砂质细砾,含文蛤等贝壳碎片

(6) 2.35~3.7 m 青灰色淤泥,局部含贝壳碎片

(7) 3.7~4.1 m 黑灰色黏土,含有小的淡绿色小结核或小球,直径 $1 \sim 2 \text{ mm}$

(8) 4.1~5 m 灰色黏土,含有钙质结核(大者 12 mm ,小者 $1 \sim 2 \text{ mm}$),并带有棕黄色斑点,未见底。

HMTC01 孔:

(1) 0~0.2 m 耕作土

(2) 0.2~0.6 m 黄色细砾质中—粗砂,大部分颗粒为次圆—圆,少量次棱角,极少量磨圆相当好。颗粒以石英砂为主,颗粒表面不干净,被黏土包裹。

(3) 0.6~0.95 m 白色细砾质砂(以中砂为主)。颗粒表面纯净,多数颗粒次圆—圆,多数为石英,少量长石、多成粗砂

(4) 0.95~1.2 m 黄色细砾质极粗砂—粗砂。多数颗粒磨圆好,含极少量的黑色重矿物。颗粒表面被黏土包裹,有氧化铁壳膜

(5) 1.2~1.4 m 黑色细砾质极粗砂—粗砂,含有大量黑色重矿物细砾,磨圆好。颗粒表面裹有黏土,颗粒之间互相粘连。

(6) 1.4~2.1 m 黄灰色细砾,含少量极粗砂。颗粒外表裹有黏土,颗粒次圆—次圆状,含少量黑色重矿物,磨圆好。有腐木碎片($0.4 \text{ cm} \times 1.7 \text{ cm}$)

(7) 2.1~2.5 m 粗砂质极细砾,含大量贝壳,含植物碎片

(8) $>2.5 \text{ m}$ 青灰色淤泥,质地较纯,几乎不含任何粉砂沉积,感觉黏性大,未见底。

HMTC02:

(1) 0~0.2 m 砂质耕作土,混有植物根系和碎石块

(2) 0.2~1.0 m 黄色含细砾—细砾质粗砂

(3) 1.0~1.3 m 白色含细砾粗砂,细砾质中-粗砂

(4) 1.3~2.0 m 黑色粗砂质细砾

(5) 2.0~3.2 m 青灰色黏土,黏性大,未见底。

3.2 沉积序列

对 4 个钻孔进行了详细的沉积环境分析,沉积序列组成为:

(1) 含钙结核棕黄色黏土层。由于钻探深度关系仅在 HMZT 孔底部见到,这套序列最突出的特征是含有钙质结核,钙结核的形成主要是由于土层中的 pH 值较大,所含 CaCO_3 在淋溶和蒸发等综合作用下,在潜水带的毛细管上升带中沉淀下来,从而形成不同形状的结核,钻孔底部的含钙结核沉积可能是晚更新世末次冰期海退时形成的产物^[15]。

(2) 黑灰色黏土层。厚度约 40 cm,含有小的淡绿色的小结核或小球,直径 1~2 mm,此层的微古样品分析仅见 *Ammonia beccarii* (Linne) vars. (毕克卷转虫变种) 4 枚,推测为滨海的沼泽环境。

(3) 青灰色淤泥或灰黑色淤泥质黏土。质地比较纯,不含任何的砂质颗粒,局部含有贝壳碎片, HMZT 孔所见到的厚度有 1.4 m。有孔虫分析揭示以 *Ammonia beccarii* 为主, *Elphidium subincertum*、*Ammonia maruhasii* 普遍出现,有时比较丰富, *Elphidium magellanicum* 个体也经常出现。 *Elphidium hispidulum* (小茸刺希望虫)、*Spiroculina* sp. (环抱虫未定种)、*Elphidium advenum* (异地希望虫)、*Quinqueloculina cf. seminulum* (半缺五块虫) 个体出现的频率相对较低, *Rectoelphidiella lepida* (精美直小希望虫)、*Ammonia paucilocula* (少室卷转虫)、*Quinqueloculina* spp. (五块虫未定种)、*Alliatina variabilis* (可变阿利提虫)、*Bolivina striatula* (条纹箭头虫)、*Cribronion porisuturalis* morphotype 1 (孔缝筛九字虫)、*cf. Elphidium hughesi* 和 *Elphidium asiaticum* (希望虫或亚洲希望虫相似种) 则比较少见。另外,还见有介形类(小玻璃介)、苔藓虫、植物碎片和木炭。属种组合显示有孔虫种类多,分异度高,属于近岸、浅水、盐度略低环境,水体深度小于 20 m,同时还显示水体略有受限。因此,单从有孔虫属种组合判断属于

一个略有受限的海湾环境的可能性比较大。

(4) 砂层。砂层的厚度不等,以北部的 HMZJ 浅钻砂层厚度最大,为 3.6 m,最薄的砂层为 HMTC-02 探槽,砂层厚度为 2 m 左右。砂层的厚度自南向北逐渐变薄,从地形上看,也是北部高、南部低。从洪门的砂层厚度以及地形判断洪门的北部为堆积厚砂层的地势高的沙堤,南部为滨海的沙滩。根据沉积物的特征砂层可分为 A、B 上下两层:

A 层(下部):贝壳砂—黑紫色含黏土含砾石极粗砂层

此层的下部普遍含有 30~40 cm 的棕黄色贝壳砂层,含有大量的贝壳,贝壳以文蛤为主,见有牡蛎和扇贝,砂质矿物以石英和长石为主,颗粒呈次棱角状。其中, HMTC02 孔没有见到其他 3 个孔均出现的含贝壳砂砾,泥质沉积物向上直接过渡到含砾极粗砂层。取此层的贝壳测得年代为 6 082~6 295 aBP。贝壳层的上部普遍发育一套含有大量砾石(30%~40%)、颗粒表面有黑紫色泥质包裹的沉积。通过体视镜观察,细砾沉积物以长石和石英质为主,显示来源于花岗质一类的母岩。颗粒形状为棱角一次棱角状,有一定磨圆,显示这些颗粒属于近源搬运;沉积物为含砾极粗砂,反映了当时洪门地区海岸的强波浪动力作用。该段沉积物厚度通常在 20~70 cm 之间变化。

B 层(上部):粗砂层

含少量细砾的中—粗砂,往上细砾含量进一步减少,直到顶部被砂质耕作土覆盖。该层细砾含量明显比下层减少,以 HMZJ 孔为例,2 m 深度以上细砾含量平均为 4.3%。通过体视镜对颗粒形态进行观测,发现该层沉积物的磨圆度明显要好于下部层位,部分颗粒可以达到次圆—圆状。本层沉积物的另一个特点是在某些层位含有较多的重矿物,如 HMZT 孔 0.2~1.5 m、HMTC01 孔 1.2~1.4 m 深度均见有较多重矿物。该层厚度 HMZJ 孔为 1.9 m, HMZT 孔为 1.3 m, HMTC01 孔为 1.2 m, HMTC02 孔为 1.1 m。

上述沉积序列具有如下特征:①砂砾质沉积具有向上变细的正旋回特点,从下往上细砾和粗砂含量逐渐减少。以 HMZJ 孔为例,平均粒径由下部的 1.68 μm 向上减小为 0.50 μm ;②砂质沉积物具有从北向南逐渐变厚的特点;③砂质沉积物之下均发育青灰色的淤泥,青灰色淤泥层之下为含有小结核的黑灰色黏土层;④在 HMZT 孔的最底部可见含有钙结核的棕黄色黏土层(图 2)。

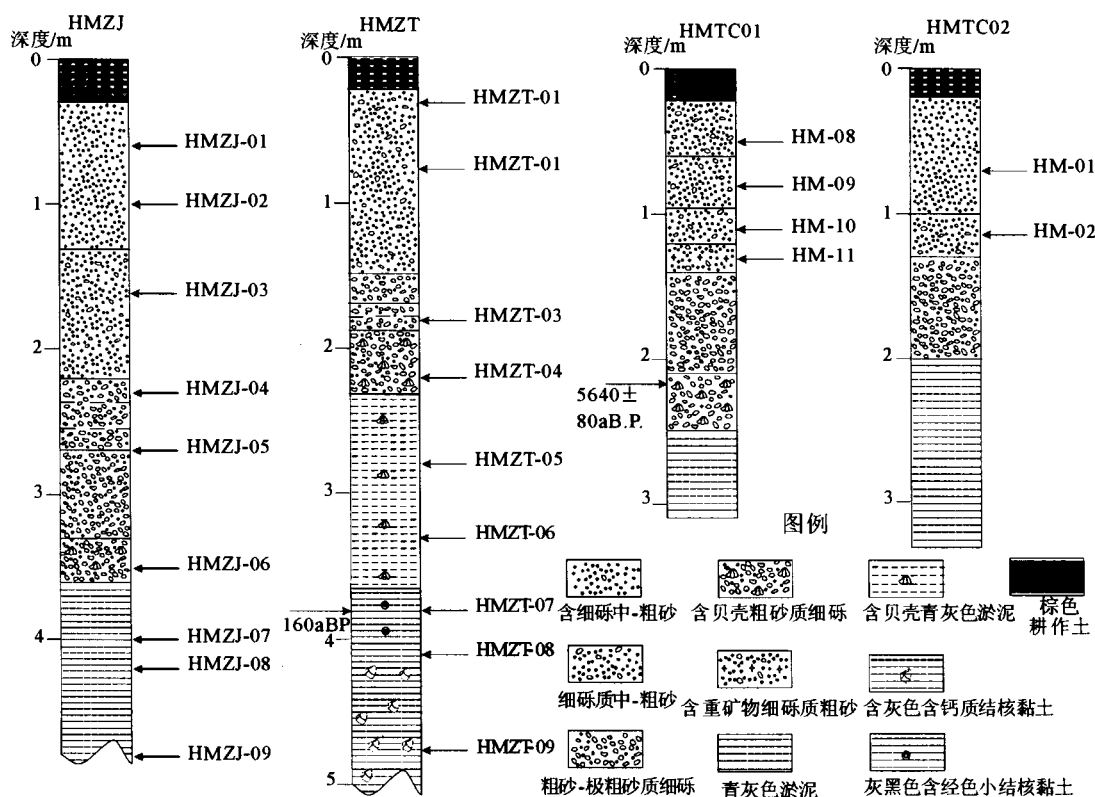


图 2 连云港洪门钻孔岩性柱状图

Fig. 2 The histogram of bores in Hongmen of Lianyungang

3.3 粒度分布

对洪门 16 个砂砾质沉积物以及 7 个泥质样进行了粒度分析,大部分砂砾质沉积物属于粗砂质细砾或细砾质粗砂,平均粒径(M_z)变化范围 $-0.747 \sim +1.002$, M_z 平均值 0.26Φ ,属于粗砂范围,与一般的海滩砂相比较,粒径明显偏粗。样品偏度 SK_1 为 $-0.353 \sim +0.323$, SK_1 平均值 -0.05 ,偏度近于对称。但 HMT01 和 HMT02 两个钻孔的样品,均以负偏为主, SK_1 平均值为 -0.17 ,与之相反, HMZJ 和 HMZT 两孔沉积物偏度均以正偏为主, SK_1 平均值为 0.09 。样品的分选性介于 $0.537 \sim 1.582$ 之间,平均值 1.006 ,属于分选中等—分选较差。与典型的海滩沉积物相比,分选性要偏差(表 1、2、3、4)。总体上看,4 个浅钻的粒度特征可以分为 3 层:

第 1 层 粗砂层:砂样粒径较中部砂层细,粒级以粗砂为主,分选性中等,偏态多呈对称或偶有负偏态,峰态呈尖锐状。除了分选性较典型海滩砂差以外,其他参数特征符合海滩砂特征。

第 2 层 砾砂层:沉积物粒度为粗砂级,并含有大量的砾石,分选较差,偏态近于对称,峰态为中等(正态)。分选性较差可能与沉积层堆积后发生海

退,沉积物未受到海浪的簸选作用,而经风化和淋溶,细物质增加所造成。

第 3 层 粉砂层:粒径在 $6 \sim 8 \Phi$ 之间,为细粉砂或极细粉砂,分选性较差至差,多为负偏,峰态多平坦至中等。

洪门古沙堤沉积物粒度的垂直变化反映了洪门地区沉积动力环境的演变过程,即由滨海沼泽、近河口的海湾沉积环境的弱沉积动力环境逐渐演变为近岸的由波浪作用的强沉积动力环境的粗砂物质的堆积。

对洪门 7 个样品做了粒度概率累积曲线分析,图形上可区分出滚动、跳跃和悬浮 3 个次总体,但是明显以滚动和跳跃两个次总体为主,滚动次总体一般占 $20\% \sim 30\%$,跳跃次总体占 $60\% \sim 70\%$,悬浮次总体一般不足 10% 。滚动次总体斜率中等,显示粗颗粒物质的分选性一般。滚动次总体和跳跃次总体之间的截点在 0Φ 位置,一般海滩砂两者的截点在 $1 \sim 2 \Phi$ 位置,此特点说明研究区具有较强的水动力环境或者来源的沉积物较粗。跳跃次总体 $0 \sim 1.2 \Phi$ 之间斜率较陡,显示跳跃总体颗粒分选性很好(图 3)。

将洪门 7 个样品的概率累积曲线和海州湾现代海滩沉积物进行对比,发现洪门古沙堤沉积物的粒

表 1 连云港洪门 HMZT 孔沉积物粒度特征
Table 1 The character of grain size of HMZT

样号	深度 /m	各粒级百分含量/%			粒度特征值					定名
		砾石	砂	粉砂	中值粒 径/ Φ	平均粒 径/ Φ	标准 偏差	偏态	峰态	
HMZT-01	0.3	8.5	91.0	0.6	0.499	0.46	0.94	-0.11	1.59	粗砂
HMZT-02	0.75	1.7	97.7	0.6	0.631	0.73	0.69	0.17	1.31	粗砂
HMZT-03	1.8	31.5	67.7	0.8	-0.33	-0.35	1.36	0.06	1.06	砾砂
HMZT-04	2.2	30.1	68.6	1.3	-0.11	-0.24	1.38	0.01	1.06	砾砂
HMZT-05	2.8	0.0	11.2	88.8	6.671	6.40	1.80	-0.35	1.32	细粉砂
HMZT-06	3.3	0.0	1.9	98.1	7.230	8.23	2.90	0.40	1.16	极细粉砂
HMZT-07	3.8	0.0	7.1	92.9	6.262	6.19	1.49	-0.07	0.82	细粉砂
HMZT-08	4.1	0.0	9.3	90.7	6.280	7.34	3.09	0.43	1.21	极细粉砂
HMZT-09	4.75	0.0	8.5	91.5	6.326	6.19	1.49	-0.14	0.87	细粉砂

表 2 连云港洪门 HMZJ 孔沉积物粒度特征
Table 2 The character of grain size of HMZJ

样号	深度 /m	各粒级百分含量/%			粒度特征值					定名
		砾石	砂	粉砂	中值粒 径/ Φ	平均粒 径/ Φ	分选 系数	偏态	峰态	
HMZJ-01	0.6	1.0	95.5	3.5	0.89	1.00	0.98	0.32	1.22	粗砂
HMZJ-02	1.0	3.0	94.2	2.8	0.74	0.88	1.01	0.26	1.39	粗砂
HMZJ-03	1.5	8.0	91.5	0.	0.70	0.73	1.24	0.04	1.21	粗砂
HMZJ-04	2.3	35.	62.4	2.4	-0.17	-0.17	1.58	0.07	0.99	砾砂
HMZJ-05	2.7	44.1	55.4	0.4	-0.79	-0.75	1.39	0.00	1.08	砾砂
HMZJ-07	4.0	0.0	13.8	86.2	6.27	6.06	1.74	-0.21	0.89	细粉砂
HMZJ-08	4.2	0.0	2.8	97.2	6.69	6.58	1.34	-0.13	0.90	细粉砂

表 3 连云港洪门 HMTC01 和 HMTC 02 孔沉积物粒度特征
Table 3 The character of grain size of HMTC01 and HMTC 02

样号	深度 /m	各粒级百分含量/%			粒度特征值					定名
		砾石	砂	粉砂	中值粒 径/ Φ	平均粒 径/ Φ	标准 偏差	偏态	峰态	
HM-01	0.7	1.90	97.66	0.44	0.50	0.50	0.54	0.01	1.44	粗砂
HM-02	1.1	5.03	94.32	0.64	0.43	0.41	0.59	-0.15	1.48	粗砂
HM-08	0.5	8.56	91.40	0.04	0.47	0.39	0.81	-0.20	1.72	粗砂
HM-09	0.8	20.20	79.65	0.16	0.31	0.07	1.14	-0.24	0.96	砾砂
HM-10	1.1	10.80	89.01	0.19	0.23	0.08	0.78	-0.35	0.96	粗砂
HM-11	1.3	25.54	74.20	0.25	-0.27	-0.34	0.93	-0.13	0.80	砾砂

注:HM-08、09、10、11 取自 HMTC01;HM-01、02 取自 HMTC02。

度概率累积曲线无法和现代海滩进行对比。海州湾现代海滩沉积物主要以跳跃次总体为主,滚动和悬浮次总体很少或缺失,并且跳跃次总体的斜率很陡,显示很好的分选性。虽然洪门沉积物和海州湾现代海滩沉积物存在差异,但是其曲线形态和海头南河口现代沉积物非常类似。我们在海头南河口采集了 3 个样品,采样点位于龙河河口北岸沙滩上,该区域既受波浪作用的影响又受河流作用的影响,洪门当

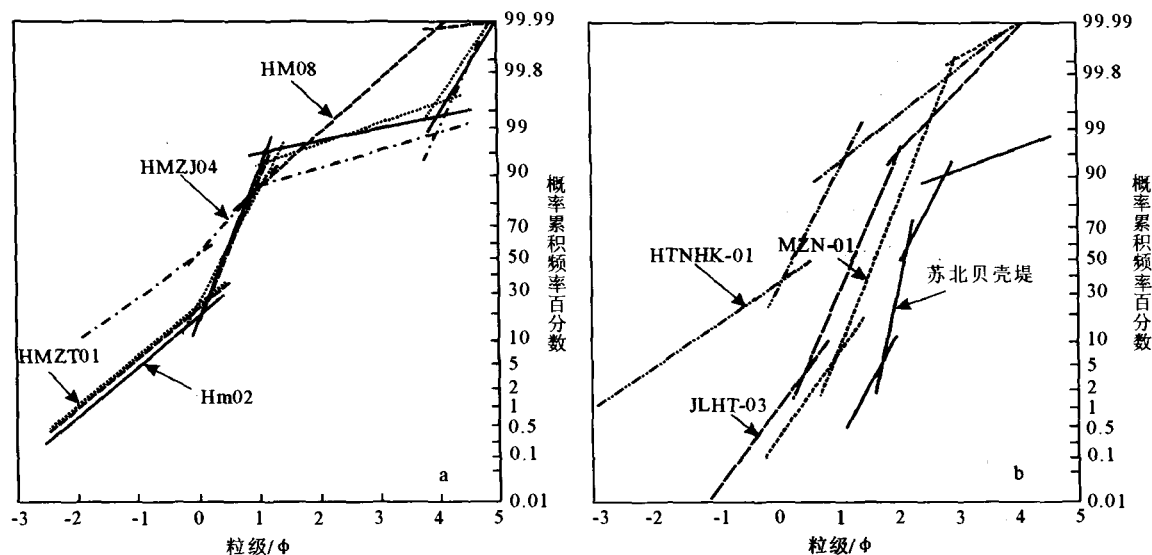


图 3 连云港洪门古沙堤沉积物粒度概率累积曲线(a)及与邻区(b)对比

JLHT-03、HTNHK-01、MZN-01 均采自海州湾现代海滩,苏北贝壳堤据顾家裕等^[5]

Fig. 3 Probability accumulation curve and comparison of grain size of shell bank sediments in Hongmen of Lianyungang

时的古环境可能与之比较类似。

3.4 探地雷达地层及其解译

在连云港洪门布置了 4 条探地雷达测线, HM01 测线和 HM04 测线沿东西向展布, HM02 测线和 HM03 测线沿南北向展布, 4 条剖面首尾相接组成一个回字型的测线网络(图 1)。在 4 条剖面中挑选了若干典型段落进行重点描述和分析。

HM02 剖面 该剖面全长约 445 m, 从洪门果园中间的小道穿过。该小道是一条宽 1.8 m 的便道, 除表层有极薄的垫土外, 主要由砂质沉积物构成。道路两侧部分地段有房屋和果园的篱笆墙, 对雷达信号产生一定的干扰。整个剖面地形高差超过 1 m, 最南端存在一个海滩脊, 北端也有一个小的海滩脊, 海滩脊之间地形相对比较平坦, HMZJ 孔位于南部海滩脊的顶部。

HM02A 展示了 HM02 剖面水平方向 0~90 m 之间的雷达图像(图 4), 水平亚连续的反射波组位于 3~4 m 深度以上, 该反射波组主要由细砾质中粗砂和砂质细砾构成, 上部细砾质粗砂和下部粗砂质细砾之间的界线在雷达剖面上由于分辨率的关系似乎不太明显, 有可能两者是连续过渡。在剖面水平方向 0~17 m、垂直方向 4~8 m 范围内, 出现亚连续倾斜反射波。垂直方向 3~4 m 深度以下的空白反射是由泥质沉积物引起的。泥质沉积物会吸收电磁波, 形成空白反射, 这与钻孔验证是一致的, 钻孔显示 3~4 m 深度以下由青灰色黏土质淤泥和黏

土组成(图 2)。水平方向 70~80 m, 垂直方向 5~10 m 深度范围内出现双曲线型反射波组, 属于干扰波。水平方向 38~48 m 之间, 垂直方向 5~8 m 深度范围以及 0~15 m 之间, 8~14 m 深度范围内出现的水平和倾斜反射波组可能属于多次反射波, 而非真实的地层反射(图 4)。

HM02B 剖面展示了 HM02 剖面水平方向 350~445 m 之间的雷达图像(图 5), 水平方向 390~445 m 之间, 垂直方向 -4 m 深度以上, 主要由亚连续波状缓倾斜反射波组构成, 水平方向 350~390 m 过渡为水平、断续反射波组。通过钻孔验证, 这两组反射波组主要是由砂砾质粗砂和砂质极细砾组成, 推测亚连续波状缓倾斜反射波组可能与进积的滨岸沉积有关, 而水平、断续反射波组可能与滨岸的垂向加积有关。-4 m 深度以下, 主要由空白反射构成, 这些空白反射是由淤泥质黏土引起的, 这已为钻孔所验证。距地表深度 1 m 左右出现的水平连续强反射波组可能由潜水面引起。水平方向 420~445 m 之间, 大约 -6 m 深度以下还可见一些波状、断续、倾斜反射波组, 有可能是多次反射造成的, 也有可能在此深度又出现砂质层, 由于缺乏钻孔验证, 目前仅能推测。

HM03 剖面: 测线沿南北向展布, 全长 335 m, 我们选取了 115~210 m 段落(图 6)。地形高差 1 m 左右, 与 HM02 测线相反, 北部地形高, 往南地形高度逐渐降低。沿测线西侧每隔 60 m 有高压电线杆分布, 可能对雷达图像造成一定的干扰。水平方向

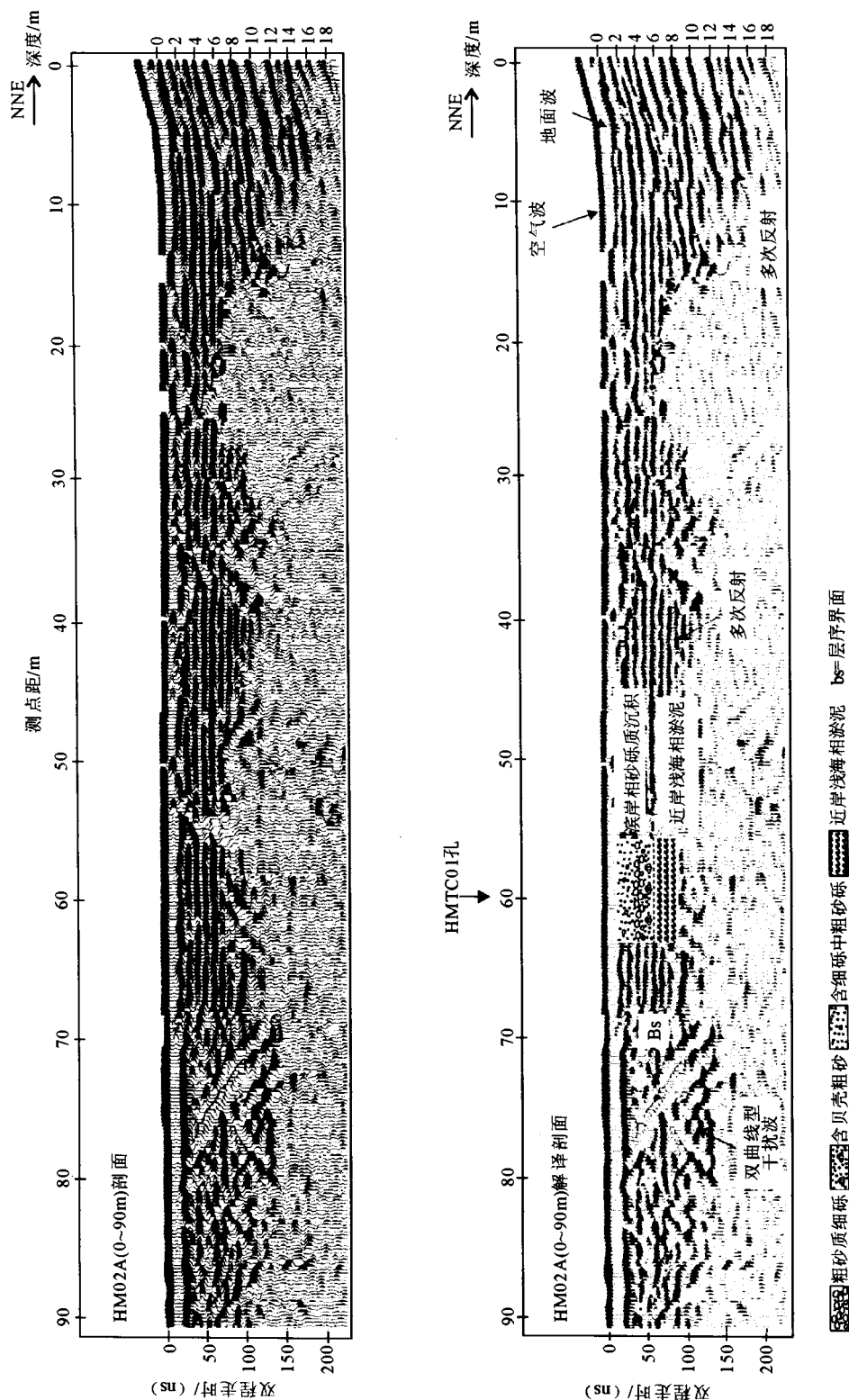


图4 连云港洪门 HMT01 孔探地雷达图像

Fig. 4 Image of ground-penetrating radar of HMT01

116~210 m 之间、垂直方向—4 m 深度以上部分主要由波状断续倾斜反射波组成(图 7), 构成所谓的“S”型反射波组, 此反射波组与进积的滨岸沉积有关^[15]。钻孔显示, 该反射波组主要由砂砾质和粗砂

质沉积组成, 显示出快速向海进积的特点。HM03 剖面—4 m 以下主要为没有反射信号的空白反射, 钻孔验证这部分反射是由泥质沉积物引起的。水平方向 180~200 m 之间、—1.5 m 深度以下出现平缓

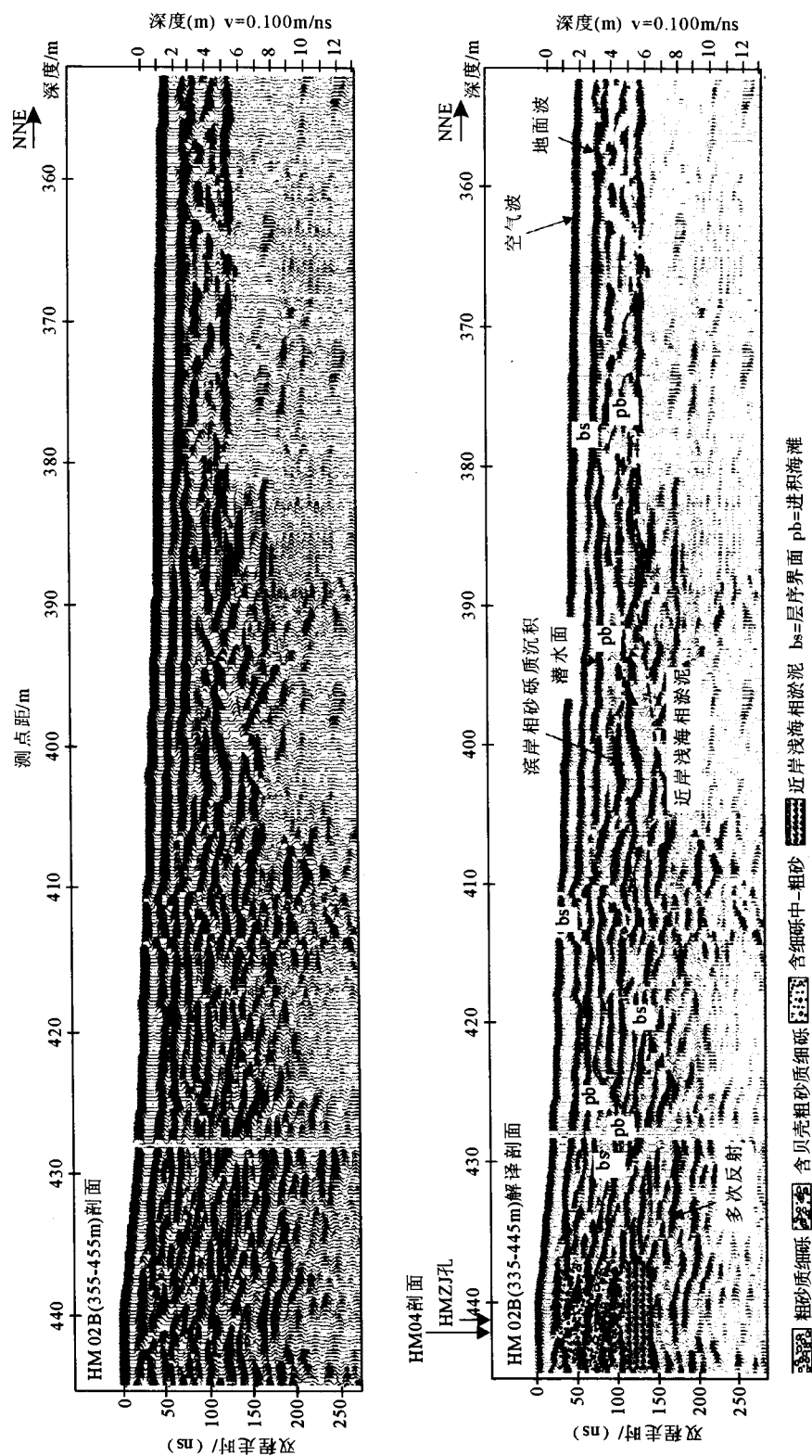


图 5 连云港洪门 HMZJ 孔探地雷达图像

Fig. 5 Image of ground-penetrating radar of HMZJ

的双曲型反射波组,可能与高压电线的干扰有关。

4 讨论

洪门钻孔虽然深度不大,却反映了丰富的环境

变化信息。通过对钻孔沉积物的沉积序列分析,再配合 ^{14}C 测年,可以恢复洪门地区全新世的古海岸环境和岸线的变迁。目前在洪门地区获得两个 ^{14}C 测年数据,一个来自于 HMZT 孔底部的钙结核黏

土,另一个来自于 HMTC01 孔下部的贝壳砂,该层贝壳砂位于下部青灰色淤泥沉积之上。洪门 HMZT 的最底部为含有钙结核的棕黄色黏土层,目前普遍认为钙结核是沉积物暴露过程中大气水的淋

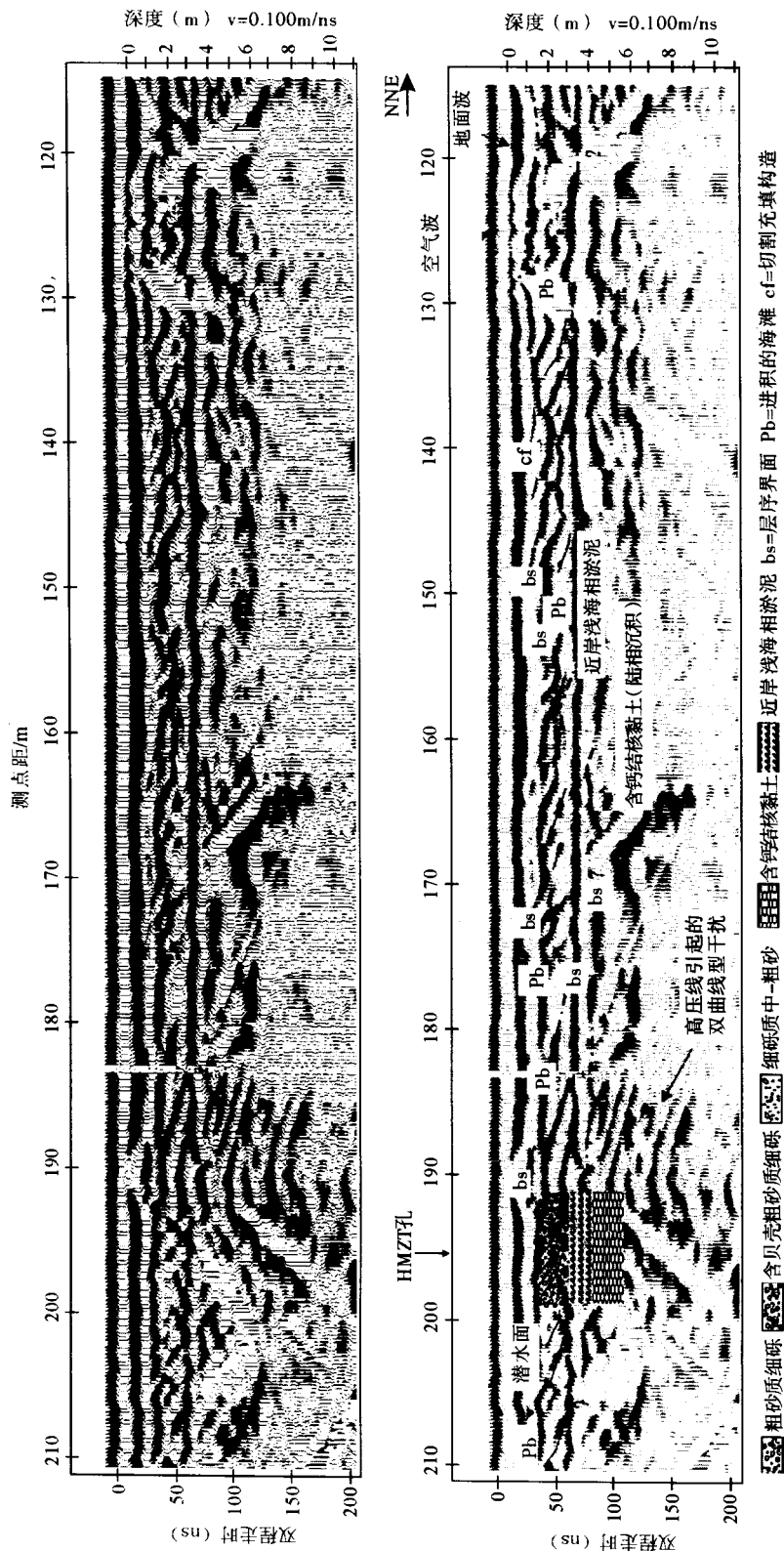


图6 连云港洪门 HMZT 孔探地雷达图像

Fig. 6 Image of ground-penetrating radar of HMZT

滤作用造成的,代表陆相沉积。连云港全新世海侵沉积层下部的陆相层多含有钙结核,这一阶段应该属于晚更新世末次盛冰期低海平面时期的陆相沉积层。全新世早期,海平面快速上升,洪门地区沉积了滨海湖沼层,并含有泥炭层,HMZT孔钙结核黏土层之上含淡绿色小结核的黑灰色黏土层获得的 ^{14}C 年代为 $(6\,430\pm 160)\text{ aBP}$,为滨海的陆相湖沼环境。此时期与青莲岗文化期的年代相吻合,说明洪门地区在该时期为陆相环境。湖沼沉积结束后,洪门地区迎来了中全新世的最大海侵,受周围地形的制约,洪门地区可能形成了河口浅海湾环境,普遍沉积了2 m左右的青灰色淤泥沉积,有孔虫组合反映当时的环境并非完全开敞,而是受到一定程度限制的近岸浅水环境,反映了洪门地区为浅海湾环境,此时的海岸线推至洪门以西可达东海平明一带。

中全新世最高海平面时期,海岸线维持在洪门,含贝壳砂层 ^{14}C 测年为 $6\,082\sim 6\,295\text{ aBP}$,随着河流搬运来的砂质沉积物的增多,洪门地区发育砂砾质滨岸沉积,沉积物特征是含有大量砾石的极粗砂层(即砂层下部的砾石极粗砂层),反映了当时海岸的强动力环境,推测沉积物来自周围山地的风化剥蚀物,没有经过长时间的搬运,颗粒粗大,此时的沉积物特点是经受了高温湿热条件下的强氧化风化作用,沉积物的颜色呈黑紫色,直到 $5\,000\text{ aBP}$ 左右海水开始退出洪门,这一次海退使连云港地区的古海岸线向东退到北云台山和中云台山之间。

洪门古沙堤沉积物的粒度分布形式比较有点,首先它和典型的碎浪带海滩沉积物有很大的差异。将洪门古沙堤和苏北中部滨海平原贝壳沙堤作对比,可以发现西岗、中岗、东岗和新岗粒级主要集中在 $2\sim 3\Phi$,主要以细砂为主,其百分含量为 $62\%\sim 77\%$,其次是 $1\sim 2\Phi$ 的中砂颗粒,其百分含量为 $7.6\%\sim 33.5\%$ ^[5]。洪门古沙堤其颗粒主要集中在 $0\sim 1\Phi$ 粗砂范围内,百分含量占 $21\%\sim 77.5\%$,其次为 $-1\sim 0\Phi$ 的极粗砂,占 $1\%\sim 27.8\%$,另有少量的极细砾。洪门古沙堤与苏北平原贝壳堤相比较,颗粒明显偏粗。其次苏北平原贝壳堤跳跃次总体的粒径分布范围为 $2\sim 3\Phi$,显示出很好的分选性,例如东岗沙堤的 $\delta_1=0.2\sim 0.4$,而洪门古沙堤分选系数平均值为1.006,分选性较差。

洪门古沙堤概率累积曲线和苏北平原贝壳堤相比具有如下特点:(1)曲线形态表现出4段式,即缓—陡—缓—陡形态,而非典型缓—陡—缓—陡海滩样式;(2)在跳跃总体部分包含了分选较差的 $2\sim 4\Phi$ 粒径的颗粒。该曲线类型显示浪流的共同作用,波

浪的簸选,含递变悬浮和推移物质的水体的高度湍动,以及强流对推移物质的搬运。因此,洪门极有可能处在一个受河流影响的河口环境,沉积物中粗颗粒极有可能是通过洪水搬运到河口,并就近在河口地区堆积,没有经过长距离的搬运。部分悬浮物质也来自河流。这部分沉积物在河口地区停积下来以后或多或少地受到波浪作用的改造,使部分砂质沉积物分选性变好,但没有典型海滩砂那样得以充分的改造。

5 结论

(1)钻孔揭示洪门地区 $6\,400\text{ aBP}$ 左右为滨海湖沼环境,随后发生海侵,在洪门形成类似河口浅海湾的古海岸环境,发育近海岸浅水相泥质沉积。 $6\,000\text{ aBP}$ 左右,随着砂砾质沉积物供应的丰富,相对海平面下降,发育砂砾质滨岸沉积,洪门古海岸沙堤就此形成,直到 $5\,000\text{ aBP}$ 左右苏北和连云港地区普遍发生海退,古沙堤发育结束,形成时代可与苏北的西冈古沙堤相对应。

(2)探地雷达揭示出洪门古沙堤内部具有向海方向的“S”型反射波组,代表砂体曾有过向海方向的进积和生长,可能指示当时有丰富的砂质来源。水平亚连续反射波组与海滩的垂向加积作用有关。砂砾质沉积之下由于存在黏土和淤泥,对电磁波有吸收作用,因此没有反射信号。研究结果表明,探地雷达和钻孔相互配合,对于揭示古沙堤的内部结构非常有效,值得加以推广。

(3)洪门古沙堤的粒径集中在粗砂—极粗砂范围,分选性偏差,粒度分布形式和海州湾现代海滩、苏北平原古贝壳堤存在很大的差异,但与靠近河口的沙咀非常类似,洪门古沙堤可能形成于靠近河口或受河口影响的环境,所含的粗颗粒和少量的悬浮物质是由河流带来堆积在河口附近的。

致谢:连云港外贸局杨海总工程师提供野外车辆以及在野外工作中给予大力帮助;加拿大微体古生物专家Jean-Pierre Guilbault教授完成有孔虫鉴定工作,有关有孔虫组合的环境意义与Guilbault教授进行了有益的讨论;中国地质大学(北京)海洋学院丁璇博士在有孔虫生态环境方面给予帮助,在此一并表示感谢。

参考文献(References)

- [1] Jol H M, Smith D G and Meyers R A. Digital ground-penetrat-

- ing radar(GPR): A new geophysical tool for coastal barrier research (example from the Atlantic, Gulf and Pacific coast, U. S. A.)[J]. *Journal of Coastal Research*, 1996,12:960-968.
- [2] Neal A, Richards J, Pye K. Structure and development of shell cheniers in Essex, southeast England, investigated using high-frequency ground-penetrating radar[J]. *Marine Geology*, 2002, 185:435-469.
- [3] Van Overmeeren R A. Radar facies of unconsolidated sediments in the Netherlands: a radar stratigraphy interpretation method for hydrogeology[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1998, 40:1-18.
- [4] Yin Y, Zhu D K, Martini I P, et al. Application of ground-penetrating radar for barrier spit stratigraphic interpretation, Hainan Island, China[J]. *Journal of Coastal Research*, 2004, 43 special issue:179-201.
- [5] 顾家裕,严钦尚,虞志英. 苏北中部滨海平原贝壳砂堤[J]. *沉积学报*, 1983, 1(2): 47-59. [GU Jia-yu, YAN Qin-shang, YU Zhi-ying. The cheniers of the northern coastal plain of Jiangsu Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1983, 1(2): 47-59.]
- [6] 赵希涛,王绍鸿. 江苏阜宁西园全新世风暴沉积与海岸沙丘的发现及其意义[J]. *中国科学 B 辑*, 1992(9): 994-1 001. [ZHAO Xi-tao, WANG Shao-hong. Holocene storm sediments and the significance of the coastal sand dune in Funing Xiyuan, Jiangsu[J]. *Science in China(Series B)*, 1992(9):994 - 1 001.]
- [7] 朱 诚,程 鹏,卢春成,等. 长江三角洲及苏北沿海地区 7000 年以来海岸线演变规律分析[J]. *地理科学*, 1996, 16(3):207-213. [ZHU Cheng, CHENG Peng, LU Chun-cheng. Palaeo coastline evolution law of Yangtze River delta and coastal area North Jiangsu Province since 7000a BP[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, 16(3):210-213.]
- [8] 张传藻. 海州湾岸线发育特征[J]. *海洋科学*, 1982(3):81-93. [ZHANG Chuan-zao. Developmental characteristics of the coastline in Haizhou Bay[J]. *Ocean Science*, 1982(3):81-93.]
- [9] 虞志英,陈德昌,唐寅德. 关于苏北平原海岸古砂堤形成年代的认识[J]. *海洋科学*, 1982(4): 25-28. [YU Zhi-ying, CHEN De-chang, TANG Yin-de. On the formation of fossil barriers in the middle flat of northern Jiangsu[J]. *Ocean Science*, 1982 (4):25-28.]
- [10] 任美鄂. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1986. [REN Mei-e. Synthetic report of Jiangsu coastal zone and tidal flat resources[M]. Beijing: China Ocean Press, 1986.]
- [11] 王富葆. 海州湾西安埋葬贝壳堤与晚更新世以来的海面变化 [C]//中国第四纪海岸线学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 1985. [WANG Fu-bao. The buried shell beach ridges and the sea-level changes from late Pleistocene in the west coast of the Haizhou Bay[C]//Proceedings of Quaternary coastline symposium, China. Beijing: China Ocean press, 1985.]
- [12] 张传藻. 连云港地理与经济[M]. 南京: 河海大学出版社, 1999:302-324. [ZHANG Chuan-zao. Lianyungang Geography and Economy[M]. Nanjing: Hehai University Press, 1999:302-324.]
- [13] Smith G D, Jol M H. Radar structure of a Gilbert-type delta, Peyto Lake, Banf National Park[J]. *Canada. Sedimentary Geology*, 1997, 113:195-209.
- [14] Van Heteren S, Fitzgerald D U, Mckinlay P A, et al. Radar facies of paraglacial barrier systems[J]. *Coastal New England, USA. Sedimentary*, 1998, 45:181-200.
- [15] 王振宇. 南黄海海州湾外侧钙质结核特征及其成因的研究 [J], *上海地质*, 1990(3): 19-29. [WANG Zhen-yu, Characteristics and the origin of the calcareous concretion outside the Haizhou Bay in South Yellow Sea[J]. *Shanghai Geology*, 1990(3):19-29.]

SEDIMENTARY CHARACTERISTICS AND ENVIRONMENTAL SIGNIFICANCE OF HONGMEN COASTAL BARRIER, LIANYUNGANG, NORTHEASTERN JIANGSU PROVINCE

XU Jun¹, YIN Yong¹, ZHU Da-kui¹, ZHU Xiao-bing¹

(1 The Key Laboratory of Coast & Island Development, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2 College of Water Resources and Environment, Hehai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on core log, ^{14}C dating, grain size analysis as well as ground-penetrating radar images, genesis of Hongmen coastal barrier and the environment were discussed. Four cores are available along ground-penetrating radar transects. The cored sedimentary succession in the coastal barrier of Hongmen area can be subdivided into three units from bottom to up. The bottom unit is mainly composed of gray to dark gray clay with calcareous concretion, which is interpreted as an exposed unit formed 6 400 aBP. This unit followed by an extensive transgression clay, probably formed in a near-shore, shallow (<20 m) and hyposaline (ca. 30 ‰) environment in accordance with foraminifera assemblages. At about 6 000 aBP, the coastline kept steady, and in this circumstance, an increase of sandy supply or a decline of relative sea level was triggered by the development of coastal barrier in Hongmen area. The lower part of the barrier is mainly composed of coarse sandy granule, with great amounts of shell. It gradually becomes granule coarse sand into the upper part of the barrier. These sandy barriers can be chronologically correlated to the sandy barriers of north Jiangsu. After about 5 000 aBP, the sea level declined and probably retreated from the area, meanwhile the development of the sandy barriers stopped.

Deposits of Hongmen coastal barrier are coarser than those of modern Haizhou Bay beach and cheniers of northern Jiangsu coastal plain. The grains are concentrated between $0\sim 1\Phi$, with a worse sorting than in modern Haizhou Bay beach sediments. It indicates that the Hongmen coastal barrier is very close to a river mouth area where flooding can carry coarse materials.

The ground-penetrating radar is tentatively used to augment standard geomorphic and stratigraphic techniques. The radar images show a series of seaward oblique reflectors, which indicate a coastal progradation during barrier growth. This coastal progradation can be interpreted as having lots of material supply during that time. The results show the ground-penetrating radar is a useful technology for interpreting coastal barrier stratigraphy which can be applied to informed, sensible land use planning and environmental assessments.

Key words: coastal barrier; grain size; ground-penetrating radar; Hongmen; Lianyungang